

Bozon Higgsa: pomiędzy starą i nową fizyką

Największe jak dotąd odkrycie naukowe XXI wieku

Wspomnienie prof. Grzegorza Wrochny, dyrektora Narodowego Centrum Badań Jądrowych w Otwocku-Świerku

To największe odkrycie naukowe od kilkudziesięciu lat! Dotyczy bowiem najbardziej elementarnych składników całej materii i fundamentalnych praw nią rządzących. Od lat 80-tych wiemy, że u podstaw wszystkich zjawisk rządzonych siłami jądrowymi i elektromagnetycznymi, więc światła i dźwięku, własności ciał stałych i gazów, a nawet chemii i biologii leży tzw. model standardowy oddziaływań fundamentalnych. Jednak aby był on w pełni zgodny z doświadczeniem musi zawierać mechanizm ustalający masy obserwowanych cząstek. Jego przejawem powinno być istnienie tzw. cząstki Higgsa, popularnie zwanej po prostu higgsem.

Polowanie na higgsa to przedsięwzięcie naukowe o skali znacznie przekraczającej lot człowieka na Księżyc. Projektowanie eksperymentów, które dokonały odkrycia rozpoczęło już w latach 80-tych. W roku 1984 na zjeździe w Lozannie nakreślono koncepcję LHC. W roku 1990 w Aachen powstały grupy robocze projektujące detektory. Tam zapadła decyzja o włączeniu się Instytutu

Probleatów Jądrowych (dziś NCBJ), Politechniki Warszawskiej i Uniwersytetu Warszawskiego w prace eksperymentu CMS. Koledzy z Krakowa wybrali drugi eksperyment (dzisiejszy ATLAS).

Pierwszym „wkładem” grupy warszawskiej miał być wyjazd do CERNu jednego z członków zespołu. Prof. Jan Królikowski, który kierował zespołem zaproponował mnie. W szybkim tempie skończyłem doktorat, 4.03.1991 obroniłem go, a 2 dni później już pracowałem nad koncepcją detektora CMS w CERNie, gdzie spędziłem 7 lat. Pierwsze projekty eksperymentów zaprezentowano na zjeździe w Evian, 5.03.1992. Zapamiętałem tę datę, bo tego samego dnia urodził się mój najmłodszy syn. Dziś jest studentem informatyki i pełnymi garściami korzysta z technologii, które wówczas w CERNie dopiero rozwijano lub testowano.

Ta dygresja pokazuje skalę czasową przedsięwzięcia. Sam poświęciłem eksperymentowi CMS kilkanaście lat życia, a niektórzy moi koledzy prawie 20. Pierwsi projektanci eksperymentów odeszli na emeryturę przed ich uruchomieniem, a najmłodsze osoby dziś pełniące wiodącą rolę nawet ich nigdy nie spotkały. Skala czasowa projektu obejmuje więc dwa pokolenia, podobnie jak niegdyś budowa gotyckich katedr.

Skala przestrzenna też jest bezprecedensowa. W sumie nad akceleratorem i detektorami pracowało rzędu 10.000 fizyków i inżynierów z kilkuset instytucji reprezentujących kilkadziesiąt krajów. Obserwowałem wspólnie pracujących naukowców z krajów będących formalnie w stanie wojny ze sobą, reprezentujących różne systemy polityczne i kultury. Sam koordynowałem prace zespołu, w którym prócz Polaków byli Amerykanie, Austriacy, Finowie, Koreańczycy, Rosjanie i Włosi. Wiele prac wykonywanych było w laboratoriach rozsianych po świecie, także w Polsce. Jednak konieczna była bardzo ścisła koordynacja działań, tak by poszczególne elementy nie tylko dały złożyć się w całość, ale zgodnie ze sobą działały. Wtedy właśnie, aby sprostać tym potrzebom wymyślono w CERNie WWW, dzięki czemu wkrótce Internet stał się dostępny dla każdego i odmienił całkowicie nasze sposoby pracy i rozrywki.

Najciekawsza jednak była skala technologiczna. Kiedy rozpoczynaliśmy prace nad eksperymentami LHC nie było jeszcze ani Internetu ani komputerów osobistych. Wymagania jakie musiały spełniać projektowane systemy zbierania, selekcji i analizy danych nie były możliwe do zrealizowania przy ówczesnej technologii. Projektowany strumień danych w jednym eksperymencie przekraczał całą ówczesną telekomunikację europejską. Musieliśmy jednak mieć świadomość, że nasze projekty zostaną zrealizowane za lat 10, kiedy technologia będzie zupełnie inna. Dlatego



śledziliśmy uważnie trendy rozwoju szybkości procesorów, pojemności dysków i pamięci, złożoności układów scalonych. Systemy zaprojektowaliśmy ekstrapolując te trendy na wiele lat do przodu. I udało się. Kiedy nadszedł czas wyposażania detektorów w elektronikę, na rynku były już dostępne komponenty o parametrach, które przewidzieliśmy.

Satysfakcja z tego, że wielkie eksperymenty przy LHC zadziałały w roku 2008 bardzo sprawnie była olbrzymia. Zadziałało największe urządzenie badawcze świata. Ale to był dopiero środek do celu. Celem był higgs i — miejmy nadzieję — kolejne odkrycia jakich dokonamy. Dziś ten najważniejszy cel został osiągnięty. Eksperymenty ATLAS i CMS zaobserwowały istnienie nowej cząstki, zgodnej z przewidywaniami Modelu Standardowego. To wielki dzień. Uwieńczenie prawie 20 lat pracy tysięcy specjalistów. Największe jak dotąd odkrycie naukowe XXI wieku i chyba największe w historii ludzkości wspólne pokojowe przedsięwzięcie.

Bozon Higgosa to brama do nowej fizyki

Wywiad z prof. dr. hab. Leszkiem Roszkowskim, kierującym w NCBJ międzynarodową grupą naukowców analizujących dane w poszukiwaniu nowych cząstek elementarnych.

W akceleratorze LHC właśnie odkryto cząstkę Higgosa. Odkryto — czy wyprodukowano?

Cząstkę Higgosa zaobserwowano po raz pierwszy, zatem jest to odkrycie. Lecz jest to cząstka nietrwała i nie istnieje poza akceleratorem LHC — zatem także ją wyprodukowano. Pamiętajmy, że stabilnych cząstek elementarnych jest niewiele, wszystkie pozostałe musimy tworzyć i bozon Higgosa niczym się tu nie wyróżnia.

Trzeba jednak mieć świadomość, że bozon Higgosa to nie „jeszcze jedna cząstka elementarna”. To cząstka wyjątkowo ważna, szczególna, ponieważ jest pierwszym zaobserwowanym przejawem istnienia w naturze pewnego pola kwantowego, dotychczas nieznanego, które jest obecne w każdym punkcie przestrzeni i odpowiada za to, że cząstki elementarne mają masę. Krótko mówiąc, odkrycie bozonu Higgosa to dowód, że pole nadające cząstkom elementarnym masę nie jest wymysłem teoretyków. Ono naprawdę istnieje.

Doświadczalne próby wykrycia nowych cząstek elementarnych są często porównywane z szukaniem igły w stogu siana.

Gdyby to było takie łatwe... Akcelerator LHC wraz z detektorami jest najbardziej skomplikowanym urządzeniem zbudowanym przez człowieka, co już dużo mówi o skali trudności stawianych fizykom cząstek przez naturę. Dalej, ilość informacji rejestrowanej w LHC w jednej sekundzie przekracza ilość informacji przekazywanej w tym samym czasie przez wszystkie telefony komórkowe świata. To istny potop informacyjny. Trzeba z niego wyłowić tylko najciekawsze zdarzenia. Robią to specjalne układy elektroniczne. Na decyzję, czy coś jest warte zapamiętania, czy nie, mają mniej niż jedną miliardową sekundy. Tych wyselekcjonowanych i zapisywanych przypadków i tak jest ogromnie dużo.

W przeciwieństwie do fizyków doświadczalnych, którzy muszą budować bardzo skomplikowane detektory, my, teoretycy, mamy znacznie bardziej komfortowe warunki pracy. Możemy „założyć nogi na biurko” i czekać na informacje, które napływają za pośrednictwem internetu.

Praca idealna?

Nie do końca. My mamy własne narzędzia do analizy danych, numeryczne i analityczne. Z kolei zespoły realizujące doświadczenia w LHC mają dane, które publikują w pracach naukowych, oraz strony w internecie, gdzie zamieszczają wstępne i dodatkowe informacje. Rzecz w tym, że te dane są tylko częściowe. Jest ich dużo, znacznie więcej niż kiedyś, ale nadal żaden zespół nie publikuje całości informacji, choćby dlatego, że samo udostępnienie tych wszystkich terabajtów danych wymagałoby ogromnego wysiłku. Dlatego teoretycy, tacy jak my, pracujący nad wnioskami wypływającymi z doświadczalnych poszukiwań, widzą dość fragmentaryczny obraz tego, co naprawdę zarejestrowano w LHC. W efekcie musimy się trochę napracować, żeby odtworzyć brakującą część danych. Nasza grupa z NCBJ stara się to robić z jak największą dokładnością i odnosimy tu sukcesy. Dlatego też możemy mieć pewne zaufanie do naszych przewidywań.



Żyjemy więc w pewnej symbiozie z grupami doświadczalników. Mówimy im na przykład: „Słuchajcie, prawie udało się nam odtworzyć wasze wyniki, ale tu i tu wychodzą jeszcze jakieś dziwne rzeczy. Macie pomysł, co z tym zrobić?”. Wtedy oni odpowiadają, że na przykład może tu chodzić o jakiś efekt czysto doświadczalny, po czym wspólnie wypracowujemy, jak można go uwzględnić w przybliżony sposób w naszych teoretycznych rachunkach — aż wreszcie osiągamy to, co trzeba. W końcu nasza praca jest także w interesie doświadczalników: po to zbierają dane, żeby te były wykorzystywane poprawnie.

Gdy dane są już odtworzone...

...patrzmy, co z nich wynika dla przyszłej fizyki. Na przykład próbujemy przewidywać, jakie znaczenie ma odkrycie bozonu Higgsa o takich a nie innych cechach dla obecnych teorii fizycznych wykraczających poza Model Standardowy, który obecnie jest używany do opisu świata cząstek elementarnych. Wiemy bowiem, że wiele modeli „nowej fizyki” opartych na idei tzw. supersymetrii przewiduje istnienie kilku bozonów Higgsa. Jeden z nich powinien mieć masę około 100-130 gigaelektronowoltów. Jednak w wielu modelach o atrakcyjnych własnościach trudno jest przekroczyć granicę właśnie ok. 125-126 GeV!

Jeśli więc bozon Higgsa będzie w końcu miał masę poniżej 126 GeV, będzie to najmniej ciekawy wynik, bo nadal dużo nowych teorii pozostanie dozwolonych. Jeśli jednak po zebraniu większej ilości danych końcowa masa przesunie się w okolice 128-130 GeV, możliwości teoretycznych nie pozostanie wiele. Ba, mogą odpaść te, które obecnie uważamy za najciekawsze, bo prowadzące do unifikacji fundamentalnych oddziaływań przyrody i wyjaśniające istnienie i ilość ciemnej materii we Wszechświecie. Masa bozonu Higgsa ok. 126 GeV może być też w potencjalnej sprzeczności właśnie z ilością ciemnej materii! Zatem nie tylko ważne jest odkrycie samego bozonu Higgsa, ale również to, jakie będą jego własności. Dopiero gdy je poznamy, będziemy rozumieli, jak zrobić kolejny krok, o którym już wiemy, że jest nieunikniony: jak zacząć pisać księgę z nową fizyką.

Jakie są praktyczne konsekwencje odkrycia bozonu Higgsa?

Jeśli ktoś liczy, że wkrótce opanujemy bezwładność i nasze samochody będą przyspieszać do setki w milisekundę, cóż, jest fantastą. Odkrycie bozonu Higgsa nie ma obecnie żadnego znaczenia praktycznego. Żadnego. To epokowe wydarzenie, ale tylko dla rozwoju fizyki.

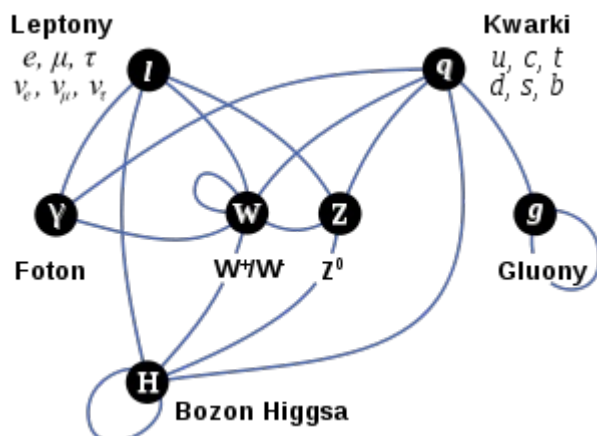
Trzeba jednak pamiętać, że w chwili odkrycia wiele zjawisk i teorii fizycznych wydawało się kompletnie nieprzydatnych. Tak było na przykład z emisją wymuszoną, którą traktowano jako abstrakcyjną ciekawostkę, a która po kilkudziesięciu latach pozwoliła skonstruować lasery. Podobnie, nikt nie widział żadnych zastosowań dla wymyślonej przez Alberta Einsteina ogólnej teorii względności. Ale gdybyśmy dziś nie uwzględniali w obliczeniach zakrzywienia czasoprzestrzeni, systemy nawigacji satelitarnej nie mogłyby działać. A fale radiowe? Gdy je odkrywano, wydawały się ciekawostką bez znaczenia. Kto więc wie, co będziemy zawdzięczali odkryciu bozonu Higgsa za kilkadziesiąt czy kilkaset lat?

Dziś ważny jest jednak inny aspekt. Żeby odkryć bozon Higgsa, musieliśmy skonstruować największe, najbardziej skomplikowane urządzenie w dziejach. Budowa LHC wymusiła ogromny postęp technologiczny. I to on jest obecnie największym zyskiem. Pamiętajmy o tym choćby korzystając ze stron WWW, które wymyślono właśnie w CERN-ie, aby umożliwić dużym zespołom fizyków rozrzuconych po całym świecie efektywny udział w eksperymentach z zakresu fizyki cząstek elementarnych. Pozornie te eksperymenty nie miały żadnego znaczenia dla naszego codziennego życia. A przecież dziś dzięki WWW czytamy gazety, robimy zakupy i szukamy pracy.

Będą kolejne higgisy?

Być może — i być może będzie też wiele innych cząstek elementarnych. Struktura teorii supersymetrycznych wymaga, aby pól Higgsa było więcej niż jedno. Każde z tych pól byłoby inaczej wzbudzone. Możliwe więc, że w przyszłości znajdziemy nowe higgisy, o innych własnościach niż obecnie odkryty. Jeśli okaże się to prawdą, pewna część cząstek elementarnych miałaby masę wskutek oddziaływania z jednym polem Higgsa, a pewna — z innym. Czy tak jest skonstruowana nasza rzeczywistość? Na odpowiedź musimy poczekać zapewne kilka lat, bo będzie potrzeba dużo większej ilości danych i też większej energii w LHC. Ale pierwszy krok został już zrobiony!

Czym jest model standardowy?



1. Cząstki elementarne z których zbudowana jest znana materia: sześć leptonów i sześć kwarków, oraz bozony cechowania przenoszące oddziaływania.

Wydaje się to niewiarygodne, ale świat naszej codzienności jest zbudowany z zaledwie czterech rodzajów fundamentalnych „cegiełek”. Podziwiamy go dzięki fotonom, bo to one oddziałują z atomami tworzącymi nasze ciała i nasze środowisko naturalne. Atomy z kolei są złożone z elektronów związanych wokół jąder atomowych. Jądra atomowe zaś to zlepki protonów i neutronów, cząstek składających się z trójek kwarków dolnych i górnych. Kwarki te są połączone dzięki oddziaływaniom przenoszonym przez gluony.

Badania prowadzone od początków XX wieku z użyciem coraz lepszych akceleratorów dostarczyły dowodów, że rzeczywistość jest jednak bardziej złożona. Oprócz elektronu, fotonu, dwóch kwarków i gluonów, istnieje w niej więcej cząstek elementarnych i całe zoo złożonych cząstek jądrowych. Tę skomplikowaną strukturę świata kwantów udało się fizykom opisać za pomocą zespołu teorii nazywanego Modelem Standardowym.

W Modelu Standardowym materia składa się z cząstek elementarnych, które dzielą się na trzy podobne grupy (rodziny). Elektron, neutrino elektronowe, kwark górny i kwark dolny tworzą pierwszą rodzinę. Druga to mion, neutrino mionowe, kwark powabny i kwark dziwny. W trzeciej rodzinie znajdziemy taon, neutrino taonowe, kwark prawdziwy i kwark piękny.

Zamiast na rodziny, można zastosować też inny podział: po prostu na kwarki i pozostałe cząstki, czyli leptony (są więc nimi elektrony, miony, taony i trzy odpowiadające im neutrina).

Wszystkie wymienione cząstki, ze względu na pewne wspólne cechy nazywane fermionami, oddziałują ze sobą. Nośnikami oddziaływań są cząstki podlegające innym prawom statystycznym - bozony. Zaliczamy do nich foton (przenosi siły elektromagnetyczne), bozony W^+ , W^- i Z^0 (odpowiedzialne za słabe oddziaływania jądrowe) oraz gluony (które przenoszą oddziaływania silne, wiążące kwarki w takie kompleksy, jak proton czy neutron).

Względna prostota Modelu Standardowego jest myląca. Gluonów jest w nim aż osiem, a wszystkie bozony mają swoich antymaterialnych partnerów, czyli antycząstki (np. antypartnerem elektronu jest pozyton, cząstka o przeciwnym znaku ładunku elektrycznego).

Model Standardowy uwzględnia wiele zjawisk zachodzących w świecie kwantów. Jednak aby jego przewidywania zgadzały się z rzeczywistością, trzeba doświadczalnie, z ogromną precyzją, dopasować niemal dwadzieścia różnych parametrów. Dlaczego parametry te są właśnie takie, a nie inne — tego nie wiemy. Z całą pewnością Model Standardowy nie jest też teorią ostateczną. Nie uwzględnia przecież istnienia grawitacji ani — wciąż hipotetycznych — cząstek ciemnej materii, która wydaje się wpływać na ruchy galaktyk. Nie wyjaśnia także, dlaczego wkrótce po Wielkim Wybuchu materia, wypełniająca go dokładnie taką samą liczbą cząstek i antycząstek, w całości nie anihilowała.

Mimo wad, Model Standardowy okazał się precyzyjnym sposobem opisu cząstek jądrowych. Swą obecną formę teoria ta przybrała w latach 70. ubiegłego wieku. Z czasem jej przewidywania potwierdzono doświadczalnie. W 1995 roku fizykom udało się zaobserwować ostatni brakujący kwark (górny, top), a pięć lat później odkryto w naturze ostatni lepton: neutrino taonowe.

Nie był to jednak koniec poszukiwań.

Podstawowy problem podczas konstruowania Modelu Standardowego tkwił bowiem w innym miejscu. Aby działały, wczesne wersje Modelu Standardowego musiały mieć cząstki elementarne

pozbawione masy! Nawet codzienne obserwacje pozwalają stwierdzić, że nie może to być prawdą: obiekty wokół nas, zbudowane z cząstek jądrowych, z całą pewnością mają masę. Teoria w rażący sposób nie zgadzała się z rzeczywistością i należało z nią koniecznie coś zrobić.

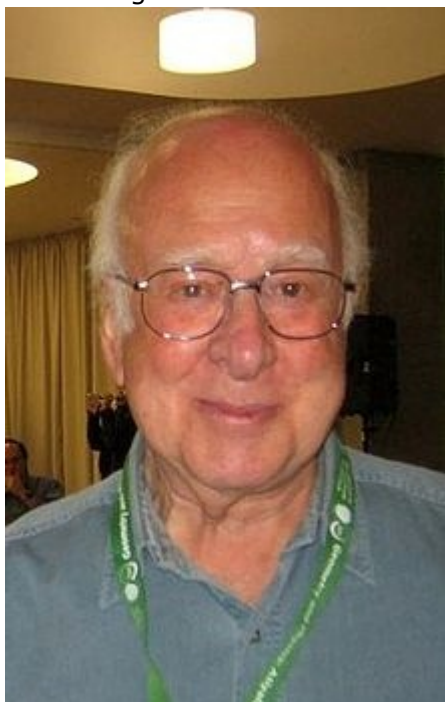
Teoretycy zaproponowali rozwiązanie: nowe pole, wypełniające cały Wszechświat. Manifestacją istnienia tego pola powinna być nowa cząstka — bozon Higgsa.

Pozostał tylko „drobiazg”: należało tę cząstkę odkryć.

Droga do bozonu Higgsa

W Modelu Standardowym zakłada się, że cząstki elementarne są wzbudzeniami pewnych pól kwantowych. Pola kwantowe tym różnią się od zwykłych pól fizycznych, że ich wzbudzenia nie mogą być dowolne. Na przykład różne wzbudzenia pola elektromagnetycznego obserwujemy jako fotony o różnych energiach. Wzbudzenie określonego pola kwantowego widzimy zawsze jako pewną, charakterystyczną dla tego pola cząstkę elementarną.

Konstruowanie Modelu Standardowego było trudne i czasochłonne, zajęło fizykom dziesięciolecia. Gdy fizycy próbowali przyporządkować masy cząstkom elementarnym, doskonale się sprawujący Model Standardowy zaczynał chorować. W teorii pojawiały się niemożliwe do usunięcia nieskończoności, świadczące o jej poważnych błędach. Na szczęście na początku lat 60. ubiegłego wieku kilku fizyków (Yoichiro Nambu, a później Robert Brout i Francois Englert) zauważyło, że problemy mogą zniknąć, gdy w Modelu Standardowym uwzględni się obecność jeszcze jednego pola kwantowego.



Pomysł został dopracowany przez brytyjskiego fizyka Petera Higgsa. Zaproponowane przez niego skalarnie pole kwantowe miało bardzo specyficzne własności. Nie tylko musiało wypełniać cały Wszechświat, w tym próżnię, ale potencjał związany z tym polem nie mógł w próżni przyjmować wartości zero. Oznaczało to, że w każdym punkcie przestrzeni powinien istnieć pewien stały wkład do gęstości energii, pochodzący od pola Higgsa.

Cząstki elementarne w Modelu Standardowym nabierają masy wskutek oddziaływania z polem Higgsa, które stawia im opór. Nowy mechanizm nie tylko tłumaczył pochodzenie masy, wyjaśniał również, dlaczego masę mają bozony W i Z, cząstki pośredniczące w przenoszeniu słabych oddziaływań jądrowych (pozostałe nośniki oddziaływań, fotony i gluony, nie mają masy).

Skoro w Modelu Standardowym wzbudzenia pól kwantowych są obserwowane jako cząstki, z nowym polem musiała być związana pewna cząstka elementarna. Nazwano ją bozonem Higgsa lub, w skrócie, po prostu higgsem (inne określenie, boska cząstka, zostało mu nadane z wyrachowaniem, wyłącznie dla celów propagandowych). Charakterystyczną cechą bozonu Higgsa jest brak spinu, pewnej cechy kwantowej. Dotychczas wykryliśmy wiele cząstek jądrowych o spinie zerowym, lecz wszystkie były obiektami złożonymi (na przykład

z par kwark-antykwar).

Odkrycie bozonu Higgsa w akceleratorze LHC to potwierdzenie istnienia w przyrodzie pola Higgsa. Oznacza, że w księdze o tytule „Model Standardowy” fizycy właśnie ukończyli ostatni rozdział. Lecz wiemy już, że ten ostatni rozdział zapowiada nową, kto wie, czy nie bardziej fascynującą od dotychczasowej księgę. Kolejny tom, który fizycy całego świata dopiero zaczynają pisać.

Znaczenie bozonu Higgsa dla współczesnej fizyki

Model Standardowy nie jest ostateczną teorią opisu struktury materii. Fizycy są tego pewni, dlatego od dawna trwają prace teoretyczne nad jego rozszerzeniem i uogólnieniem. Ekstremalne wymagania technologiczne fizyki cząstek elementarnych powodują, że pomysły pojawiają się znacznie szybciej niż możliwości ich doświadczalnej weryfikacji. Dość powiedzieć, że obecne odkrycie bozonu Higgsa było możliwe dopiero po wybudowaniu akceleratora LHC i jest pierwszym dowodem potwierdzającym istnienie w przyrodzie mechanizmu nadającego masy cząstkom elementarnym,

który to mechanizm został zaproponowany... w latach 60. ubiegłego wieku.

W ciągu ostatniego półwiecza teoretycy przedstawili wiele propozycji rozszerzenia Modelu Standardowego. Bozon Higgsa jest obecnie jedyną cząstką elementarną pozbawioną spinu, pewnej cechy kwantowej. Grupa nowych teorii, nazywanych supersymetrycznymi, zakłada, że wszystkie fermiony (kwarki i leptony) mają swoich supersymetrycznych partnerów i że są to cząstki podobnie jak higgs elementarne, a ich spin także jest równy zero. Poszukiwanie cząstek supersymetrycznych to dziś jedno z najważniejszych zadań realizowanych w akceleratorze LHC. Są one bowiem najpoważniejszymi kandydatami na ciemną materię, istnienie której zdają się potwierdzać obserwacje astronomiczne ruchów galaktyk i ich gromad.

Inny zespół teorii zakłada istnienie technicoloru, nowego typu oddziaływania, które powinno zachodzić między pewnymi, jeszcze nieodkrytymi cząstkami elementarnymi. W tym ujęciu mechanizm Higgsa, odpowiadający za masy cząstek elementarnych, pojawia się nie na zasadzie deklaracji precyzyjnie dopasowanej do wymogów teorii, lecz wskutek zachodzących w tej teorii dynamicznych procesów.

Dodatkowe wymiary przestrzeni to kolejna próba rozszerzenia Modelu Standardowego, wywodząca się z teorii strun. Teoria wymusza w tym przypadku istnienie aż dziesięciu wymiarów przestrzennych. Widzimy zaledwie trzy, ponieważ siedem wymiarów byłoby mocno zwiniętych. To zwinięcie można sobie wyobrazić poprzez analogię z kartką: kartka ma (w praktyce) dwa wymiary przestrzenne, możemy ją jednak zwinąć w tak ciasny rulon, że z daleka będzie on wyglądał jak jednowymiarowy pręt. Teorie odwołujące się do dodatkowych wymiarów wymagają, w mniejszym lub większym stopniu, uwzględnienia niektórych idei supersymetrii.

Ciekawym aspektem nowych teorii — a wymieniliśmy tylko trzy najpopularniejsze podejścia — jest możliwość unifikowania oddziaływań występujących w naturze. Unifikacja oznacza, że oddziaływania, które w niskich energiach wyglądają na różne i od siebie niezależne, w wysokich energiach „stapiają się” w jedno oddziaływanie. Od czasów Maxwella wiadomo na przykład, że pole elektryczne i pole magnetyczne są przejawami istnienia tego samego pola — elektromagnetycznego. W XX wieku oddziaływania elektromagnetyczne udało się unifikować z jądrowymi słabymi. Obecnie fizycy dążą do połączenia oddziaływań elektroślabych z jądrowymi silnymi — są to teorie tzw. Wielkiej Unifikacji. Budzą one wielkie zainteresowanie, bo unifikacja oddziaływań elektromagnetycznych i jądrowych słabych oraz silnych wymaga tak wysokiej energii, że można zacząć realnie myśleć o połączeniu wyłaniającego się z niej oddziaływania z grawitacją (a grawitacja w Modelu Standardowym w ogóle nie była uwzględniona). W kierunku wielkich unifikacji idą prace zwłaszcza w zakresie teorii supersymetrycznych oraz teorii strun.

Przedstawione próby rozszerzenia Modelu Standardowego prezentują najbardziej popularne podejścia do zagadnienia. Każda teoria, a nawet jej wariant, narzuca dość wyraźnie ograniczenia na zakres mas dozwolonych dla bozonu Higgsa. Jednocześnie większość teorii, zwłaszcza aspirujących do wielkiej unifikacji, nie potrafi odtworzyć bozonu Higgsa o masie zaobserwowanej ostatnio w LHC. Oznacza to, że bozon Higgsa i jego własności stały się papierkiem lakmusowym weryfikującym poprawność wielu dotychczasowych idei fizycznych.

Tak jak kanion wytycza kierunek, w którym biegnie nurt rzeki, tak bozon Higgsa wskazuje teraz drogę ku nowej fizyce.

Jak działa Wielki Zderzacz Hadronów?



2. CERN

Akcelerator LHC (*Large Hadron Collider*, czyli Wielki Zderzacz Hadronów) znajduje się w ośrodku CERN pod Genewą. Jest najbardziej skomplikowanym urządzeniem skonstruowanym przez człowieka, rodzajem mikroskopu pozwalającego badać świat w bardzo małych skalach. W akceleratorze dochodzi do zderzeń dwóch poruszających się w przeciwne strony wiązek cząstek — protonów lub jąder ołowiu.

LHC nie jest konstrukcją samodzielną. Aby działał, potrzebny jest cały kompleks akceleratorów, stopniowo rozpędzających cząstki jądrowe do coraz większych energii.

Wszystko zaczyna się od wodoru, którego atomy składają się z jednego protonu i jednego elektronu. Atomy te raz na kilka godzin są pobierane z niewielkiej butli i jonizowane, czyli „odzierane” z elektronów. Tak otrzymane protony są kierowane do akceleratora liniowego Linac 2, gdzie rozpędza się je mniej więcej do 30% prędkości światła. Następnie trafiają do akceleratora PS Booster i tu ich energia kinetyczna wzrasta niemal 30-krotnie. Z Boostera protony są przekazywane do Synchronotru Protonowego PS, a potem do Supersynchronotru Protonowego SPS, na każdym etapie zwiększając energię ok. 20 razy. Niecałe pięć minut po opuszczeniu butli protony trafiają wreszcie do wnętrza tunelu Wielkiego Zderzacza Hadronów. Każdego dnia w LHC rozpędza się zaledwie kilka nanogramów (10^{-9} g) wodoru. Oznacza to, że gram tego pierwiastka wystarczyłby mniej więcej na milion lat pracy akceleratora.

Jeśli w LHC mają się zderzać wiązki jąder ołowiu, ich wstępne rozpędzanie wygląda nieco inaczej niż w przypadku protonów, jednak ostatnie etapy drogi także wiodą przez akceleratory PS i SPS.

W LHC cząstki są formowane w dwie przeciwbieżne wiązki. Biegają one w dwóch równoległych rurach średnicy kilku centymetrów. Rury ułożono ok. 100 metrów pod ziemią, w kolistym tunelu o obwodzie 27 km. Aby cząstki nie rozpraszaly się za szybko na gazach, wewnątrz rur (na całej długości tunelu!) panuje ultrawysoka próżnia.

Docelowo protony będą rozpędzane w LHC do prędkości ok. 0,999999991 prędkości światła i w każdej sekundzie okrążą tunel ponad jedenaście tysięcy razy. Aby zmusić cząstki o tak dużych energiach do ruchu w kolistym tunelu, trzeba zakrzywić ich tory za pomocą pola magnetycznego wytwarzanego przez ponad 1200 potężnych elektromagnesów. Prąd płynący przez uzwojenia magnesów ma natężenie kilkunastu tysięcy amperów — jak w niewielkim wyładowaniu atmosferycznym.

Elektromagnesy w tunelu LHC zbudowano z nadprzewodników, czyli materiałów, które w bardzo niskich temperaturach nie stawiają oporu elektrycznego. Wszystkie nadprzewodniki są schłodzone do temperatury zaledwie 1,9 stopnia powyżej zera bezwzględnego (oznacza to, że wewnątrz LHC jest chłodniej niż w otwartej przestrzeni kosmicznej). Oprócz magnesów dipolowych, prowadzących cząstki wzdłuż rur próżniowych, LHC wyposażono w zespoły magnesów ogniskujących i korekcyjnych, które zapobiegają rozbieganiu się wiązek i ogniskują je w punktach zderzeń wewnątrz detektorów.

Protony we wnętrzu akceleratora krążą w paczkach po ok. 100 miliardów. Energia jednej paczki może odpowiadać energii eksplozji nawet 80 kg trotylu. W tunelu akceleratora, w siedmiometrowych odstępach, jednocześnie może krążyć ponad 2800 takich paczek. W ostatecznej konfiguracji akceleratora obie protonowe wiązki będą miały energię pociągu o masie 800 t, pędzącego z prędkością 150 km/h. Kontrolowanie tak dużej energii przez tak złożone urządzenie jest unikatowym w skali świata wyzwaniem naukowym i technicznym.

Po przyspieszeniu wiązek do właściwej energii, cząstki mogą krążyć w tunelu przez wiele godzin. Intensywność wiązek stopniowo maleje z powodu kontrolowanych zderzeń wiązek w detektorach oraz skutek rozpraszania cząstek na resztkach gazu w rurach próżniowych. Po paru godzinach wiązki są wypuszczane z tunelu i kierowane na bloki grafitowe, gdzie wytracają swoją energię.

Podczas zderzenia wiązek energia kinetyczna pierwotnych cząstek (protonów lub jąder ołowiu) przekształca się w nowe, w większości nietrwałe cząstki. Zadaniem detektorów jest identyfikacja cząstek powstających w zderzeniach, pomiar ich położenia w przestrzeni, ładunku elektrycznego, prędkości, masy i energii. Naprawdę ciężkie cząstki mają czasy życia krótsze od jednej pikosekundy (10^{-12} s) i nie mogą być obserwowane w żadnym układzie detekcyjnym. Ich badanie jest możliwe tylko dzięki analizie energii i pędów zarejestrowanych produktów ich rozpadu.

Cząstki z obu przeciwbieżnych wiązek zderzają się ze sobą tylko w wybranych miejscach. W punktach przecięcia wiązek wybudowano detektory czterech głównych eksperymentów: ATLAS, CMS, ALICE i LHCb. ATLAS jest największym detektorem LHC. Zawiera osiem nadprzewodzących cewek magnetycznych, każda długości 25 m, ułożonych w kształcie cylindra wokół rury wiązki znajdującej się w środku detektora. Cały ATLAS ma 46 m długości, 25 m wysokości i 25 m szerokości, waży 7000 t. Trochę mniejszy CMS jest prawie dwukrotnie cięższy.

Maksymalna liczba zderzeń proton-proton w LHC może sięgać miliardów na sekundę — to miliony razy więcej przypadków niż umiemy zapisać. Dlatego specjalne układy elektroniczne dokonują na bieżąco selekcji, oddzielając zderzenia ciekawe (do zapisania) od nieciekawych.

Udział Polaków w poszukiwaniach bozonu Higgsa

Odkrycie bozonu Higgsa nie byłoby możliwe bez akceleratora LHC. Kosztował on ok. 10 mld euro i powstał dzięki wspólnemu wysiłkowi kilkudziesięciu państw Europy i świata. Polscy podatnicy pokryli cztery procenty kosztów budowy i uruchomienia Wielkiego Zderzacza Hadronów i są jego współwłaścicielami.

Zespoły naukowe z naszego kraju zaangażowały się w prace nad LHC od momentu podjęcia decyzji o jego budowie przez radę CERN 16 grudnia 1994 roku. Polscy naukowcy brali udział w przygotowaniu programu badań fizycznych, stworzyli wiele narzędzi obliczeniowych, zajmowali się projektowaniem, testowaniem i budową elementów aparatury detekcyjnej czterech największych eksperymentów (ATLAS, CMS, LHCb i ALICE) oraz instalacją i testowaniem podukładów samego akceleratora. W pracach uczestniczyły następujące instytucje: Narodowe Centrum Badań Jądrowych (jako Instytut Problemów Jądrowych, IPJ), Instytut Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie (IFJ PAN), Uniwersytet Warszawski (UW), Akademia Górniczo-Hutnicza (AGH) w Krakowie, Uniwersytet Jagielloński (UJ), Politechnika Warszawska (PW) i Politechnika Krakowska (PK).

Poszukiwanie bozonu Higgsa oraz tropienie zjawisk wykraczających poza obecne teorie fizyczne to główne cele eksperymentu CMS. Zespół warszawski, w którego skład weszli naukowcy z IPJ, UW i PW, zaprojektował, zbudował i przetestował złożony system elektroniki decyzyjnej, służący do selekcji najciekawszych zdarzeń z udziałem mionów. Obejmuje on 12 kaset z (łącznie) 108 płytami elektronicznymi, zawierającymi 400 programowalnych procesorów logicznych FPGA. Grupa warszawska wykonała również system przesyłania informacji z detektora CMS do odległego o kilkadziesiąt metrów holu elektroniki. W tym celu 730 łączy optycznych obsługuje 120 kaset z (łącznie) 1700 płytami kodującymi dane z 2316 komór detekcyjnych. Ważnym wkładem teoretycznym do eksperymentu CMS było opracowanie przez polskich fizyków metod poszukiwania nowych cząstek elementarnych.

Drugim eksperymentem istotnym dla poszukiwań bozonu Higgsa jest ATLAS. Tu zespół krakowski wykonał projekt i symulację systemu selekcji zdarzeń i akwizycji danych. Opracowano pakiet do symulacji detektora ATLAS oraz algorytmy poszukiwania bozonu Higgsa. Ważnym wkładem były prace nad odpornymi na promieniowanie krzemowymi detektorami i wyspecjalizowanymi układami scalonymi oraz testy układów hybrydowych. Zaprojektowano i przetestowano układy sterowania oraz oprogramowanie systemu zasilaczy wysokiego napięcia, zbudowane następnie przez polską firmę Fideltronik. Zespół krakowski uczestniczył też w budowie układu kontroli i monitorowania detektora, odpowiada również za koordynację systemów gazowych i chłodzenia w całym detektorze oraz opracowanie metod instalacji komór mionowych. Podpory, na których stoi ATLAS, wykonała firma Budimex S.A. Mostostal Kraków w kooperacji z Hutą im. T. Sendzimira.

Analizę teoretyczną danych wpływających z eksperymentów przy LHC zajmują się zespoły w różnych ośrodkach. W Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku działa kilkunastoosobowa, międzynarodowa grupa fizyków zaangażowanych w tę tematykę. Grupa jest prowadzona przez prof. dr. hab. Leszka Roszkowskiego, finansowanego z grantu programu WELCOME Fundacji na rzecz Nauki Polskiej. Zespół analizuje dane otrzymane w LHC i sprawdza ich znaczenie dla poszukiwań nowych teorii fizycznych, wykraczających poza Model Standardowy. Przewidywania formułowane na podstawie informacji z LHC są tu zestawiane z wynikami

doświadczeń i obserwacji przeprowadzonych w ramach innych eksperymentów, takich jak astronomiczne pomiary ilości ciemnej materii we Wszechświecie. Wyniki teoretyczne grupy z NCBJ są uznawane za jedne z najlepszych na świecie i w istotnym stopniu zawężają obszary poszukiwań nowych cząstek elementarnych w LHC.

Materiał przygotowany przez Narodowe Centrum Badań Jądrowych w Świerku

(Publikacja: 05-07-2012)

Oryginał. (<http://www.racjonalista.pl/kk.php/s,8171>)

Contents Copyright © 2000-2012 Mariusz Agnosiewicz

Programming Copyright © 2001-2012 Michał Przech

Właścicielem portalu Racjonalista.pl jest Fundacja Wolnej Myśli.

Autorem portalu jest Michał Przech, zwany niżej Autorem.

Żadna część niniejszych opracowań nie może być wykorzystywana w celach komercyjnych, bez uprzedniej pisemnej zgody Właściciela, który zastrzega sobie niniejszym wszelkie prawa, przewidziane w przepisach szczególnych, oraz zgodnie z prawem cywilnym i handlowym, w szczególności z tytułu praw autorskich, wynalazczych, znaków towarowych do tego portalu i jakiegokolwiek jego części.

Wszystkie elementy tego portalu, wliczając w to strukturę katalogów, skrypty oraz inne programy komputerowe są administrowane przez Autora. Stanowią one wyłączną własność Właściciela. Właściciel zastrzega sobie prawo do okresowych modyfikacji zawartości tego portalu oraz opisu niniejszych Praw Autorskich bez uprzedniego powiadomienia. Jeżeli nie akceptujesz tej polityki możesz nie odwiedzać tego portalu i nie korzystać z jego zasobów.

Informacje zawarte na tym portalu przeznaczone są do użytku prywatnego osób odwiedzających te strony. Można je pobierać, drukować i przeglądać jedynie w celach informacyjnych, bez czerpania z tego tytułu korzyści finansowych lub pobierania wynagrodzenia w dowolnej formie. Modyfikacja zawartości stron oraz skryptów jest zabroniona. Niniejszym udziela się zgody na swobodne kopiowanie dokumentów portalu Racjonalista.pl tak w formie elektronicznej, jak i drukowanej, w celach innych niż handlowe, z zachowaniem tej informacji.

Plik PDF, który czytasz, może być rozpowszechniany jedynie w formie oryginalnej, w jakiej występuje na portalu. **Plik ten nie może być traktowany jako oficjalna lub oryginalna wersja tekstu, jaki prezentuje.**

Treść tego zapisu stosuje się do wersji zarówno polsko jak i angielskojęzycznych portalu pod domenami Racjonalista.pl, TheRationalist.eu.org oraz Neutrum.eu.org.

Wszelkie pytania prosimy kierować do redakcja@racjonalista.pl